

BME Műszer- és Méréstechnika Tanszék

Biológiai rendszerek identifikációja hibrid optimalizációs mód-
szerekkel

Bánsági László, Tóth Endre és Sztipánovits János

Elsőrendű célunknak tekintjük, hogy egy hazánkban eddig kevésbé ismert számítástechnikai eszköz - a hibrid számítórendszer - orvosi biológiai alkalmazásainak egyik lehetőségére felhívjuk a figyelmet. Nem kívánunk ezért sem az optimalizációs módszerek elméleti kérdéseivel, sem identifikációs kísérleteink, eredményeink értelmezésével foglalkozni.

A hibrid számítórendszer

Elmult évben fejeztük be a BME Műszer- és Méréstechnika Tanszékén egy hibrid számítórendszer kiépítését. A digitális gép a tanszék TPA/i kisszámítógépe (12 K-szó operatív memóriával, disk háttértárral), az együttműködő AC-04 típusjelzésű analóg számítógép teljes egészében tanszéki fejlesztő és kivitelező munka eredménye. Az analóg gép jelenlegi kiépítésében 64 műveleti erősítővel (összegezők és integrátorok), számjegyesen állítható potencióméterrel, szorzóval, beépített függvénygenerátorral és egyéb aritmetikai elemekkel, valamint a hibrid együttműködés céljára szolgáló logikai készlettel rendelkezik. A gép különlegesen nagy műveleti sebességet (10 ms - 100 ms számítási idő) biztosít, a számításokat ismétlő üzemben végzi, így a mindenkori megoldás a gép beépített display képernyőjén állókép formájában jelenik meg.

A két gép közötti együttműködést biztosító csatolóegység (teljes egészében a tanszék építette ki) részei:

- analóg-digitális csatornarendszer (1 db szukcesszív approximációs A/D átalakító, 16 multiplex csatorna, 8 követ/tárol erősítő),

- digitális-analóg csatornarendszer (4 D/A átalakító, 4 D/A szorzó potenciométer, 1 interpoláló D/A átalakító),
- vezérlés átvadó csatornarendszer (érzékelő vonalak, vezérlő vonalak, 4 program megszakítási vonal),
- programozható óra (valós és gépi idő mérése, jelzés a programozott idő elteltével, programozott impulzus-sorozat kiadása).

Közelmúltban fejeződött be egy általános célú hibrid software fejlesztése, amelynél a TPA/i SLANG3/FORTRAN rendszert használtuk fel. A hibrid szubrutin könyvtár lehetővé teszi az analóg gép számára alkalmas fixpontos tört formátumu adatok kezelését is, valamint az alapvető új funkciók programozását. A felhasználói hibrid programok igény szerint vagy magasabb szintű assembly nyelven (SLANG3), vagy FORTRAN-ban írhatók. A FORTRAN compiler biztosítja a FORTRAN utasításoknak assembly utasításokkal való vegyítését (ami a hibrid utasítások tömör programozása céljából fontos). A felhasználói programokat célszerű a "Hybrid Executive" rendszerprogramon keresztül hívni, ami a következő lehetőségeket adja:

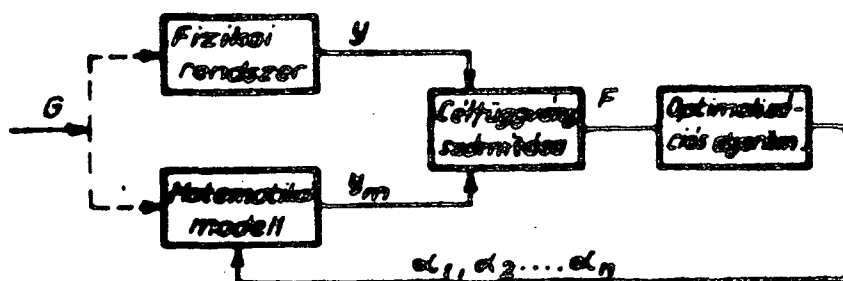
- felhasználói programok (jelenleg 5) tetszés szerinti hívása hívókarakterrel, szükség szerint menetközbeni átváltás,
- teljes ki- és beviteli adatforgalom előre programozása, változók és csatornák egymáshoz rendelése, részeredmények és végeredmények programozott, tetszés szerinti időben történő kiírása,
- interaktív beavatkozás programozása (pl. a digitális program paramétereikhez az analóg gép potenciométereinek hozzárendelése, ezzel az utóbbiak menetközbeni, tetszés szerinti változtatása),
- időfüggvények mintavételezésének és visszajátszásának programozása és kezelése,
- a csatolóegység (és ezen keresztül az analóg gép) valamennyi funkciójának billentyűzetről való kezelése.

A hibrid software-t hibrid célprogram könyvtár egészíti ki, amelynek fejlesztése folyamatos. Ide tartoznak a közelebbi mondanivalónk szempontjából érdekes hibrid optimalizációs programok is.

Hibrid számítórendszerünk részleteit illetően a rendszert ismertető közleményeinkre: (1), (2) és (3) utalunk.

Paraméter identifikáció

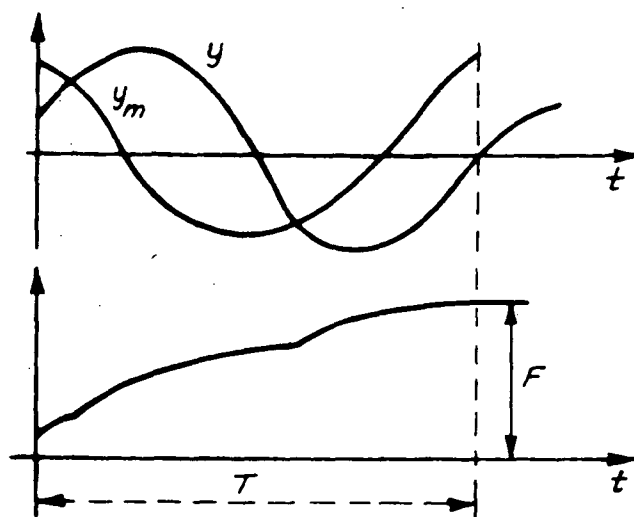
A paraméter identifikáció az optimalizációs problémák körébe tartozó feladat, alapgondolata az 1. ábra alapján követhető.



1. ábra

Feltételezzük, hogy valamely G gerjesztő függvény hatására a vizsgálandó fizikai rendszer $y(t)$ válaszfüggvénnyel felel, a rendszer paramétereinek identifikálása ennek alapján történik (biomedikai vizsgálatoknál válaszfüggvény lehet pl. a (villamos)potenciál változása, nyomásváltozás, valamely összetevő koncentrációjának változása, stb.). Részint a vizsgált fizikai rendszer belső összefüggéseinek analízise, részint a válaszfüggvény jellege alapján felállítható a matematikai modell, ami

számítógépen (digitális vagy analóg) realizálható. Ugyanazon gerjesztőfüggvény hatására a matematikai modell $y_m(t)$ válaszfüggvénnyel felel. Ha feltételezzük, hogy a fizikai rendszer viselkedését $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ paraméterek befolyásolják, ugyanezeket a paramétereket a matematikai modellen változtathatóra kell kialakítani. (Megjegyzendő, hogy általános esetben a modellt gerjesztő függvény sem ismert és ennek helyes értékét is az identifikációs folyamat során kell megtalálni.) Valamely identifikációs folyamat kezdetekor a matematikai modellen becsült paraméter értékeket állítunk be, így várhatóan a fizikai rendszer és a modell válaszfüggvénnyel nem fedik egymást (2. ábra).



2. ábra

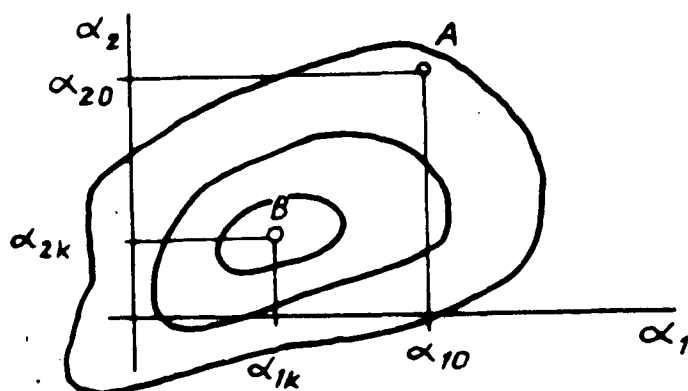
A két rendszer azonosítása céljából a válaszfüggvényekből F célfüggvényt számítunk, ami a feladat természetétől függően sokféleképpen definiálható. Kézenfekvő a válaszfüggvények pillanatértékei különbségének abszolút értékét vagy négyzetét integrálni a T számítási időre (2. ábra), vagyis:

$$F = \int_0^T |y_m - y| dt, \text{ vagy :}$$

$$F = \int_0^T (y_m - y)^2 dt \quad .$$

Az identifikáció ezek után egy olyan optimalizációs feladat, amelyben az $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ paraméterek alkalmas módosításával, iteratív uton az F célfüggvény minimális értékét kell megkeresni. Amennyiben a modell tökéletesen leírja a fizikai rendszert, a célfüggvény zérusra csökkenthető, ami a két válaszfüggvény teljes fedését jelenti.

A célfüggvény a vizsgált esetben a rendszer paramétereinek függvénye: $F = F(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. Csupán két változót feltételezve, a célfüggvényről szemléletes képet kapunk. A 3. ábra szerint ez egy szintvonalakkal ábrázolható felület (a szintvonalak állandó F értékhez tartoznak), amelynek minimumhelyét kell megkeresni. Az optimalizációs algoritmus feladata az, hogy valamely $A(\alpha_{10}, \alpha_{20})$ pontból kiindulva a minimumhelyet kijelölő B pont α_{1k}, α_{2k} paramétereit állítsa be a modellen. Ezek a paraméterek a vizsgált fizikai rendszert optimálisan leíró, identifikált paraméterek.



3. ábra

Több paraméteres identifikációs feladatok esetén a művelethez többdimenziós felület képe rendelkezhető. Hangsúlyozni kell, hogy a 3. ábrán személtetett felület önkényesen egyszerűsített, mert általában a többdimenziós felületen számos lokális minimum is van. Az is az optimalizációs algoritmus feladata, hogy ezekből ki tudjon lépni és meg tudja találni a rendszerre jellemző abszolút minimumot.

Nem célunk itt az optimalizációs algoritmusok tárgyalása, csupán utalunk arra, hogy idők folyamán nagyszámu optimalizációs stratégiát fejlesztettek ki, ezekkel az irodalom bőségesen foglalkozik.

Paraméter identifikáció hibrid számítógérendszeren

Ha a paraméter identifikációt hibrid számítógérendszerrel hajtjuk végre, a feladatok elosztása a két gép között kézenfekvő: a matematikai modellt (ez általában differenciálegyenlet-rendszert jelent) az analóg gépen kell realizálni, ugyanakkor a vezérlési és tárolási feladatok ellátására, valamint az optimalizációs algoritmusok végrehajtására a digitális gép az alkalmasabb. A célfüggvényt egyszerű analóg kapcsolás számítja.

A matematikai modellnek az analóg gépen való felépítése kettős előnnyel jár:

- Az analóg gépen az integrálás egyetlen műveleti elemmel, rövid idő alatt végrehajtható (a digitális gépen számos rész-művelet eredményeként, numerikus approximációval). Ugyanakkor az analóg gép valamennyi műveletet párhuzamosan hajtja végre, tehát a feladat bonyolultságától függetlenül az előírt számítási idő alatt (esetünkben 10-100 ms). A digitális gépen az integrálások egymás után mennek végbe, bonyolultabb rendszer esetén egyetlen megoldás is tetemes időt igényelhet. Ezek eredményeként az analóg gépen lényegesen hamarabb nyerhető egy-egy megoldás (bonyolultabb rendszerek esetében 2-3 nagyságrenddel gyorsabban, mint digitális gépen), vagyis a teljes számítás lényegesen kevesebb időt igényel.

- Az analóg gépen a vizsgált rendszerről a válaszfüggvény képernyőn való felrajzoltatása útján közvetlen, szemléletes képet kapunk. A kezelőnek közvetlen lehetősége van a modell paramétereinek menetközbeni változtatására, és a változtatás eredményének közvetlen érzékelésére, vagyis az analóg gép eleve biztosítja az interaktív üzemmódot. Nagy előny, hogy szükség esetén könnyen lehet a modell struktúráján is változtatni, kísérletezni.

A hibrid programrendszer kialakításakor alapvető célnak tekintettük, hogy az analóg gép hibrid üzemben is megtartsa előnyös tulajdonságait, és tegye lehetővé az interaktív üzemet. Ezt a software rendszer vázolásakor említett szolgáltatásokkal teljes mértékben sikerült elérni.

Paraméter identifikációs feladatok hibrid megoldása rendszerünkkel a következőképpen végezhető.

a.) A kiépített hardware és software eszközök lehetővé teszik a vizsgálandó fizikai rendszer válaszfüggvényeinek mintavételes mérését. Az óra automatikus programozásával a vizsgálati idő 10 ms -tól 10^4 s -ig adható meg folyamatosan, a mintavételes pontok száma maximálisan 400 lehet. A rendszer közvetlenül biztosítja, hogy az analóg gépen nyert megoldásból is lehessen mintavételes méréssorozatot végrehajtani. Villamos jelek analóg magnetofonról átjátszhatók, vagy méréssorozatok eredményei pontonként is bevihetők. A rendszer interpoláló D/A átalakítója a tárolt pontsorból lineáris interpolációval időfüggvényt képez, és az analóg gép számítási idején belül tetszőleges időalappal, ismétlődő üzemben visszajátssza. Ezzel a szolgáltatással tehát széles határok között válaszfüggvények időtranszformációja realizálható.

b.) A matematikai modellt megvalósító analóg kapcsolás programtáblán dugaszolással állítható össze, a változtatható paraméterekhez tetszés szerinti D/A átalakítók vagy szorzó típusu D/A potenciométerek rendelhetők.

c.) Az optimalizációs célprogram-könyvtárból kiválaszthatók a megfelelő optimalizációs algoritmusok. Jelenleg több gradiens módszer áll rendelkezésre (Newton-Raphson módszer, optimum gradiens módszer), egy véletlen szám keresési algoritmus (random search), valamint a számítás lezárására egy parabolikus interpoláló

algoritmus. Az igényeknek és tapasztalatoknak megfelelően a célprogram-könyvtár fejlődik. Az algoritmusokhoz hívó karakterek vannak rendelve, miáltal billentyűzetről tetszés szerinti sorrendben behívhatók és egymás között cserélhetők.

d.) A Hybrid Executive-on keresztül előkészítjük a programot, ami az ismeretlen paraméterek számának, kezdő értékének, a felhasznált D/A csatornacímének megadását, valamint az algoritmusok jellegzetes állandóinak és az automatikus kiíratás előprogramozásának előírását jelenti. Az optimalizációs algoritmusok hatékonyságát nagymértékben növeli, ha a kijelölt A/D csatornákon keresztül az algoritmusok állandói az analóg gép potenciométerei segítségével menetközben is változtathatók (pl. gradiens módszereknél a próbalepés nagysága, véletlen keresésnél a véletlen számok tartománya, optimum gradiens módszerrel a csökkentési állandó, stb.).

Az identifikációs művelet sor megindítása után a kétcsatornás display ernyőjén a kezelő maga előtt láthatja a fizikai rendszer válaszfüggvényét, valamint a modell által adott válaszfüggvényt, vagy a hibaintegrált. A tulvezérlés elkerülése érdekében a művelet általában kisebb időalappal kezdődik, és ha erre az algoritmus megtalálta a megoldást, a kezelő növeli a műveleti időt. Szükség esetén a kezelő beavatkozhat, elállíthatja a folyamatot, algoritmusokat vagy algoritmus állandókat válthat, részeredményeket kiírathat. Ez utóbbiak tartalmazhatják a mindenkor hibaintegrál értékét, valamint a felület aktuális parciális deriváltjainak közelítő értékét is, ami lehetővé teszi a felület analízisét.

Számos hibrid paraméter identifikációs kísérlet eredményeként megállapítható, hogy a megoldás gyorsan, szemléletesen és jól kézbe tarthatóan adódik. Az identifikáció pontossága nyilvánvalóan a feladat természetétől is függ (pl. az egyes paraméterekre való érzékenységtől), átlagos feladatoknál általában néhány ezrelékes hiba várható a névleges értékre vonatkoztatva). Az interaktív beavatkozás lehetősége biztosítja, hogy az eddig kidolgozott viszonylag primitív algoritmusokkal is megoldhatók a "nehéz", sok lokális minimummal rendelkező felületen lejátszódó

optimalizációs feladatok.

Ha a valóságos fizikai rendszerek vizsgálata esetén az identifikálás végeredményeként az eredeti válaszfüggvény és a modell által adott válaszfüggvény nem fedí tökéletesen egymást (a hibaintegrál nem csökkenthető zérusra), ez arra utal, hogy a feltételezett modell nem tökéletes. Ekkor közvetlen lehetőség van a kísérletezésre, és a modell strukturájának változtatásán keresztül a vizsgált rendszer hűebb leírására, a rendszer identifikálására.

A következőkben bemutatjuk a hibrid identifikációs eljárás alkalmazási lehetőségét egy biomedikai problémánál. Az artériális keringési rendszer Goldwyn-Watt féle harmadrendű modellje (6) a vérnyomás-görbe diastole alatti szakaszának leírására szolgál. A modell, melynek villamos helyettesítő képe a 4. ábrán látható, az alábbi differenciálegyenlet-rendszerrel írható le:

$$u_1 = - \frac{1}{C_1} \int i \, dt + U_{10}$$

$$u_2 = \frac{1}{C_2} \int (i - \frac{u_2}{R}) \, dt + U_{20}$$

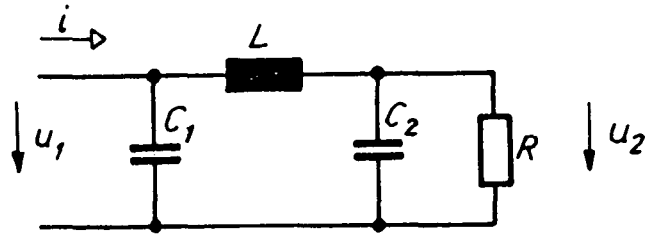
$$i = \frac{1}{L} \int (u_1 - u_2) \, dt + I_0$$

A differenciálegyenlet-rendszer hat paramétert:

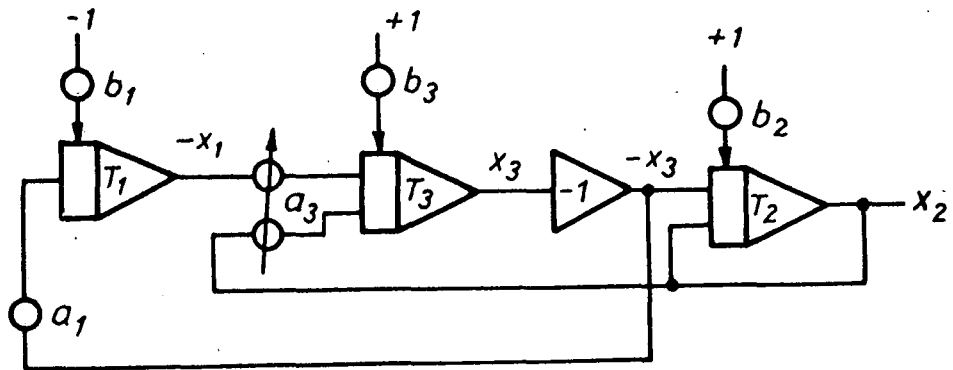
$$\{C_1, C_2, L, U_{10}, U_{20}, I_0\}$$

tartalmaz, amiket a diastole alatt mért nyomásgörbe (a villamos modellen U_2) alapján kell identifikálni. (A (7) irodalomban a fenti paraméterek tisztán digitális elvű identifikációjára közölnek módszert.)

A differenciálegyenlet-rendszernek megfelelő analóg modell az 5. ábrán látható.



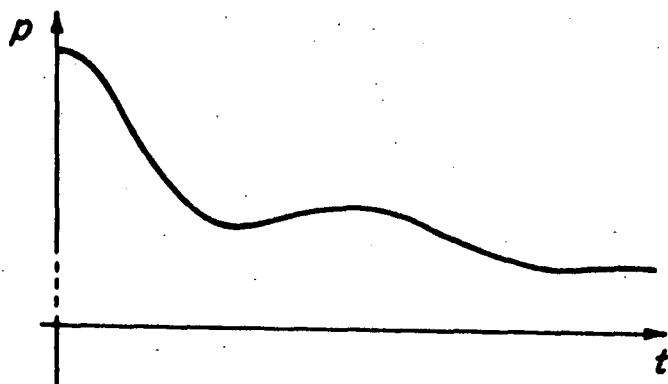
4. ábra



5. ábra

Az analóg modellben természetesen az analóg számítógépnek megfelelő konstansok és változtatható paraméterek szerepelnek, azaz integrátorok időállandói, és digitális potenciométerek osztásviszonyai. Ezekkel felírva a differenciálegyenlet-rendszert, könnyen meghatározhatjuk az analóg modell és a villamos modell paramétereinek kapcsolatát.

Mivel tényleges nyomásgörbe nem állt rendelkezésünkre, az identifikációt az analóg modellből nyert görbére végeztük el. A görbe paramétereit úgy választottuk meg, hogy alakja "hasonlítson" a (6) irodalomban közölt, egyik patológias esetben megfelelő görbealakhoz (6. ábra). Az identifikációs eljárás során a referencia-görbe paramétereit 0,5 %-nál kisebb eltéréssel kaptuk vissza.



6. ábra

A fentiekben leírt példa természetesen csak egy a nagyszámu lehetőség közül. A módszer minden olyan esetben alkalmazható, amikor a biológiai rendszerek dinamikus tulajdonságainak megismerése a cél.

Összefoglalás

A hibrid módszerek az identifikációs problémák gyors, pontos, rugalmas megoldását teszik lehetővé. A közölt alkalmazási példán látszik, hogy a módszer két vonatkozásban is eredményesen alkalmazható :

- Lehetővé teszi, hogy a vérnyomás-görbe analiziséből egy paraméterhalmazt nyerjünk, mely objektíven jellemzi a keringési rendszer adott szakaszainak állapotát, és így diagnosztikai értékkel bír.

- Lehetővé teszi, hogy az analóg kapcsolat strukturájának változtatásával a kutató orvos tovább finomíthassa a vizsgált rendszer modelljét.

Irodalom

- (1) Dr. Tóth E.: Hibrid számítórendszer alkalmazása az oktatásban. "Számítástechnikai oktatás a hazai felsőoktatási intézményekben" c. konferencia kiadványa.
- (2) Bánsági L., Dr. Tóth E.: Új, nagysebességű univerzális hibrid számítórendszer fejlesztésének kérdései. "Számítás-technika '74" konferencia kiadványa (749.o.)
- (3) Bánsági L., Dr. Tóth E.: Hibrid számítórendszer. Mérés és Automatika 1974. 8. sz. (303. o.)
- (4) A. Dekey, J. Karplus: Hybrid computation. J. Wiley, 1968.
- (5) Ralston: Bevezetés a numerikus analízisbe. Műszaki Könyvkiadó, 1969.
- (6) R.M. Goldwyn, T.B. Watt: Arterial Pressure Pulse Contour Analysis Via a Mathematical Model for the Clinical Quantification of Human Vascular Properties. IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-14, Jan. 1967, pp. 11-17.
- (7) C.S. Burrus, T.W. Parks, T.B. Watt: A Digital Parameter-Identification Technique Applied to Biological Signal. IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-18, Jan. 1971. pp. 35-37.